

中条山铜矿峪变石英二长斑岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义*

李宁波^{1,2} 罗勇³ 郭双龙⁴ 姜玉航^{1,2} 曾令君^{1,2} 牛贺才^{1**}

LI NingBo^{1,2}, LUO Yong³, GUO ShuangLong⁴, JIANG YuHang^{1,2}, ZENG LingJun^{1,2} and NIU HeCai^{1**}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 南阳师范学院环境科学与旅游学院 南阳 473061

4. 中条山有色金属集团有限公司 垣曲 043700

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. School of Environment Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

4. Zhongtiaoshan Non-ferrous Metals Group Co., Ltd, Yuanqu 043700, China

2013-02-01 收稿, 2013-05-04 改回.

Li NB, Luo Y, Guo SL, Jiang YH, Zeng LJ and Niu HC. 2013. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of metamorphic quartz-monzonite porphyry from Tongkuangyu area, Zhongtiao Mountain and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2416-2424

Abstract The formation time of the metamorphic quartz-monzonite porphyry associated with the Tongkuangyu porphyry copper deposit is still controversy. A set of zircon U-Pb geochronology and in-situ Hf isotopic date was presented in this study for the metamorphic quartz-monzonite porphyry. The result show that the discordia upper intercept age $2121 \pm 10\text{Ma}$ and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age range from 2065Ma to 2196Ma, have a weighted average age $2117 \pm 13\text{Ma}$. This age ($2117 \pm 13\text{Ma}$) is accounted as the formation time of the metamorphic quartz-monzonite porphyry from Tongkuangyu porphyry copper deposit, and is approximately consistent with the extension of the North China Craton (NCC), especially the activity of Zhongtiao rift which is located in the southern part of NCC. In addition, zircons Hf isotopic characteristics ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ range from -7.79 to 0.39) indicate that the old crustal materials played an important role in the petrogenesis. So, we conclude that the Tongkuangyu porphyry Cu deposit is a typical porphyry Cu deposit formed in inner continental settings, which genetic with the large-scale extension of the NCC.

Key words Zhongtiao Mountain; Tongkuangyu; Zircon U-Pb geochronology; Zircon Hf isotope; Inner continental environment

摘要 中条山铜矿峪斑岩型矿床的成矿斑岩形成时代一直存在争议。本文通过对铜矿峪矿床中变石英二长斑岩的 U-Pb 年代学研究发现: 铜矿峪变石英二长斑岩的 36 颗锆石的上交点年龄为 $2121 \pm 10\text{Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄从 2065Ma 到 2196Ma, 加权平均年龄为 $2117 \pm 13\text{Ma}$, 这与铜矿峪矿床的 Re-Os 同位素年龄 (2108Ma) 在误差范围内一致, 暗示了成岩成矿的一致性。锆石的 Hf 同位素特征显示, 样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-7.79 \sim 0.39$, 显示出斑岩的形成与古老地壳的部分熔融有关。同时, 铜矿峪变石英二长斑岩的形成时代与华北地区的一些 A 型花岗岩, 双峰式火山岩等与伸展有关的火成岩的形成时代大体一致, 同时也与中条裂谷的活动一致, 说明铜矿峪变石英二长斑岩形成于一个伸展的动力学背景下。因此, 本文认为铜矿峪矿床是与大陆伸展环境的斑岩型矿床。

关键词 中条山; 铜矿峪; 锆石 U-Pb 年代学; 锆石 Hf 同位素; 陆内环境

中图法分类号 P588.132; P597.3

* 本文受国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB416603)资助。

第一作者简介: 李宁波, 男, 1985 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: liningbo@gig.ac.cn

** 通讯作者: 牛贺才, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 地球化学专业, E-mail: niuhe@gig.ac.cn

铜矿峪矿床位于山西省垣曲县北部(图 1a),产于华北克拉通南缘的中条山“人”字型古裂谷带中,是我国大型铜矿床之一,有人认为它是世界上最古老的斑岩型铜矿床(Chen *et al.*, 1998)。虽然有学者认为铜矿峪矿床为铁氧化物型铜矿床(周雄, 2007),但是更多的学者倾向于该矿床为斑岩型铜矿床(陈文明和李树屏, 1998; Chen *et al.*, 1998; 王植和闻广, 1957; 许庆林, 2010; 真允庆, 1999)。自从 Emmons (1918) 定义“斑岩型铜矿床”以来,该类矿床由于其储量大、易开采等特点而备受关注。斑岩型铜矿床的形成与岩浆活动关系密切,因此确定有关斑岩体的形成时代和机制对揭示

矿床的成因和指导勘探开发至关重要。

铜矿峪矿床的主要含矿岩石为变质石英晶屑凝灰岩和变质石英二长斑岩等(胡维兴和孙大中, 1987)。对于上述岩石,不同的测年方法得到的年龄数据不尽相同:陈文明和李树屏(1998)对铜矿峪铜矿中的金属硫化物进行了 Re-Os 同位素定年,得到了绢英片岩中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄 $2947 \pm 28\text{Ma}$; 变质石英二长斑岩、绢英片岩中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $2108 \pm 32\text{Ma}$,由此认为铜矿峪矿床的形成经历了多期地质事件,但是 2108Ma 左右为其主要成矿阶段;此外,陈文明等(1996)得到变二长花岗斑岩的 Re-Os 模式年龄

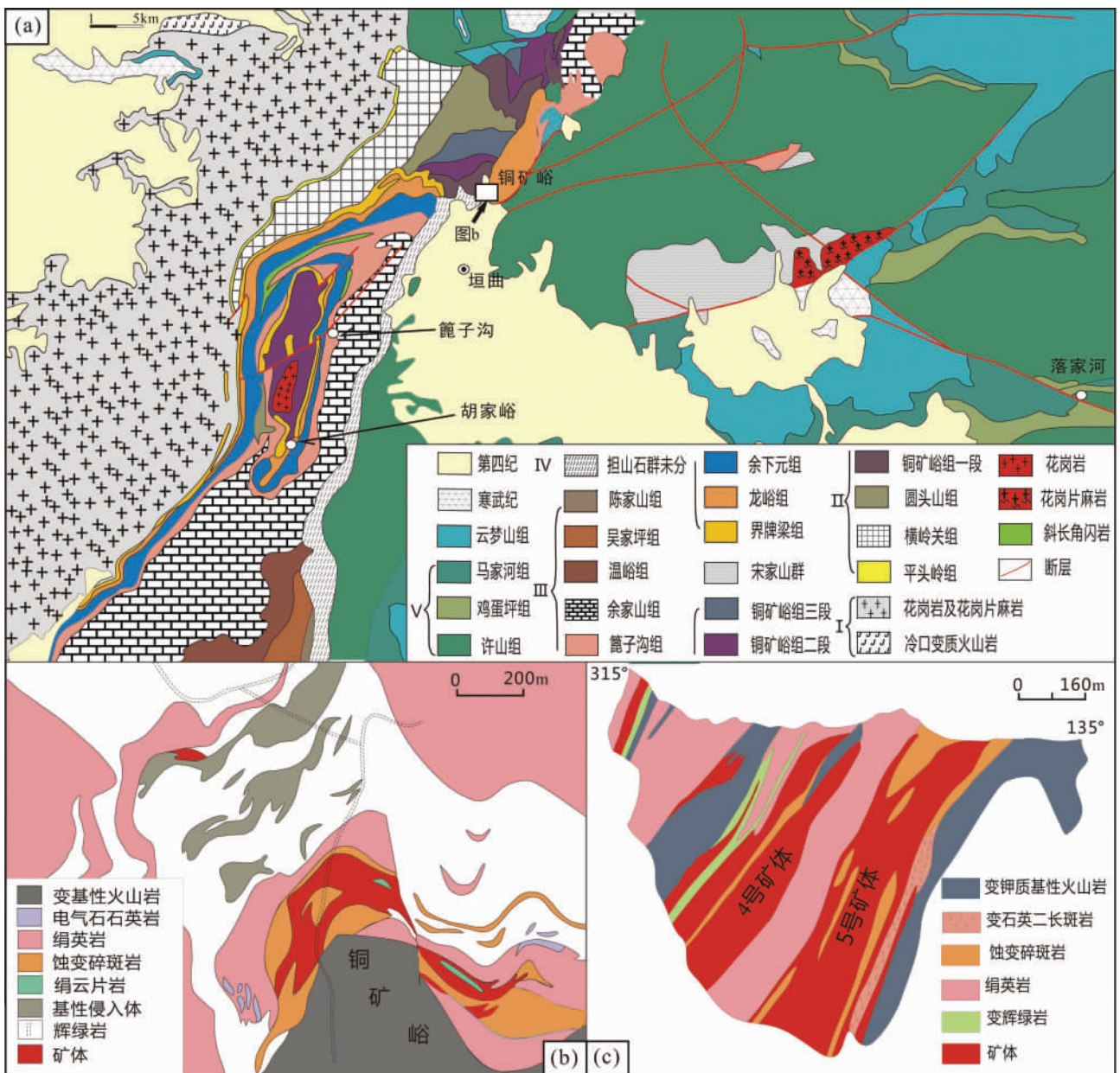


图 1 铜矿峪地区地质简图 (a)、铜矿峪矿区地质简图 (b) 和铜矿峪铜矿剖面图 (c) (据孙大中和胡维兴, 1993)

Fig. 1 Geological map of the Zhongtiao area (a), briefly geological map of Tongkuangyu mining area (b) and geological section map of Tongkuangyu mineral deposit (c) (after Sun and Hu, 1993)

为 2076 ~ 2140Ma; 孙大中等 (1991) 通过锆石 U-Pb 稀释法得到变石英晶屑凝灰岩的年龄为 $2182 \pm 15\text{Ma}$; 孙海田和葛朝华 (1990) 得到变石英二长斑岩和变石英晶屑凝灰岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $1778 \pm 27\text{Ma}$ 。尽管人们试图从多角度限定铜峪矿床的形成时代, 但到目前为止还没有一个统一的认识。

本文拟通过对产于铜峪铜矿体中变石英二长斑岩进行了单颗粒锆石的 U-Pb 定年和原位 Hf 同位素的研究, 旨在确定与矿化有关岩浆岩的形成年龄, 从而对矿床的形成时代和动力学背景进行初步的探讨。

1 地质背景和样品特征

中条山地区是华北克拉通前寒武系地层主要发育地区之一, 也是我国重要铜矿产地之一 (胡维兴和孙大中, 1987)。该地区主要分布有三种类型的铜矿床, 它们分别是以铜峪矿床为代表的斑岩型铜矿, 以胡家峪和篦子沟矿床为代表的内源沉积再造型铜矿和以落家河矿床为代表的变质火山热液型铜矿 (图 1a)。其中以铜峪矿床储量最大, 已探明的金属铜储量超过了 200 万吨。区域地层至下而上主要分为五个岩性带 (图 1a): I. 涑水杂岩带, 主要为一套变质杂岩体; II. 绛县群, 其下部为变质泥岩, 中上部主要为变质高钾火山岩 (铜峪矿床和落家河矿床的赋矿围岩); III. 中条群, 主要为一套陆缘-碳酸盐沉积变质岩系 (胡家峪和篦子沟铜矿床的赋矿围岩); IV. 担山石群, 主要由变砾岩等变质岩组成, 其代表了华北克拉通最终克拉通化的构造事件; V. 西阳河群, 由双峰式火山夹沉积岩构造, 为华北克拉通的盖层 (孙大中等, 1991; 孙大中和胡维兴, 1993)。铜峪矿床位于铜峪复向斜中, 该向斜的北翼为倒转层位, 而南翼地层则为正常产状, 矿床主要位于复向斜的正常翼 (图 1b)。矿体的围岩主要为绛县群上部的变质高钾火山岩和绢英岩。铜峪矿床拥有大小超过 300 个矿体, 但以 4 号和 5

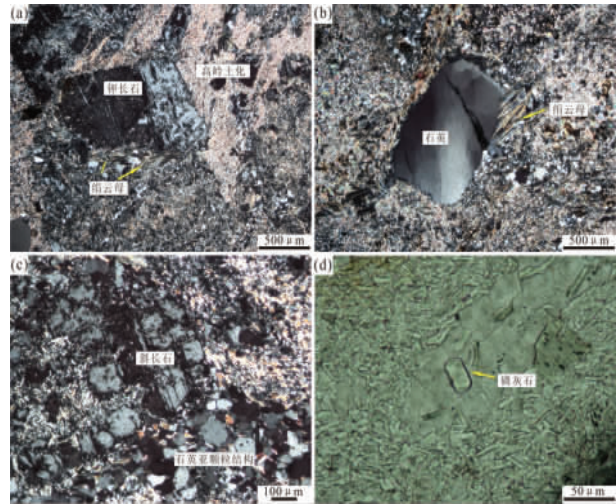


图 2 铜峪变石英二长斑岩显微照片

Fig. 2 Microphotographs of the metamorphic quartz-monzonite porphyry from Tongkuangyu area

号矿体为主 (图 1c), 这两个矿体金属储量超过了矿床总储量的 90%, 而且这两个矿体具有典型的斑岩型铜矿的矿化特征。

本次研究所取的样品 (BF6) 属于 5 号矿体内部的发生强烈的蚀变小型变石英二长斑岩岩体 (1c), 而岩体本身也是矿体一部分。变石英二长斑岩具有典型的斑状结构, 斑晶主要为石英、钾长石和斜长石, 基质主要由石英、长石以及蚀变矿物组成, 此外岩石中还含有磷灰石、锆石等副矿物, 次生矿物以绢云母和高岭土为主。斑晶中的钾长石和斜长石均发生了强烈蚀变, 而石英则受到了动力变质作用的影响, 显示出明显的波状消光和亚颗粒化结构 (图 2b, c)。岩石中所选出的锆石呈柱面发育的长柱状, 具有浅紫红色, 常含有熔体包裹体, CL 图像显示出明显的震荡环带 (图 3a), 说明其具有岩浆锆石的特征 (吴元保和郑永飞, 2004)。

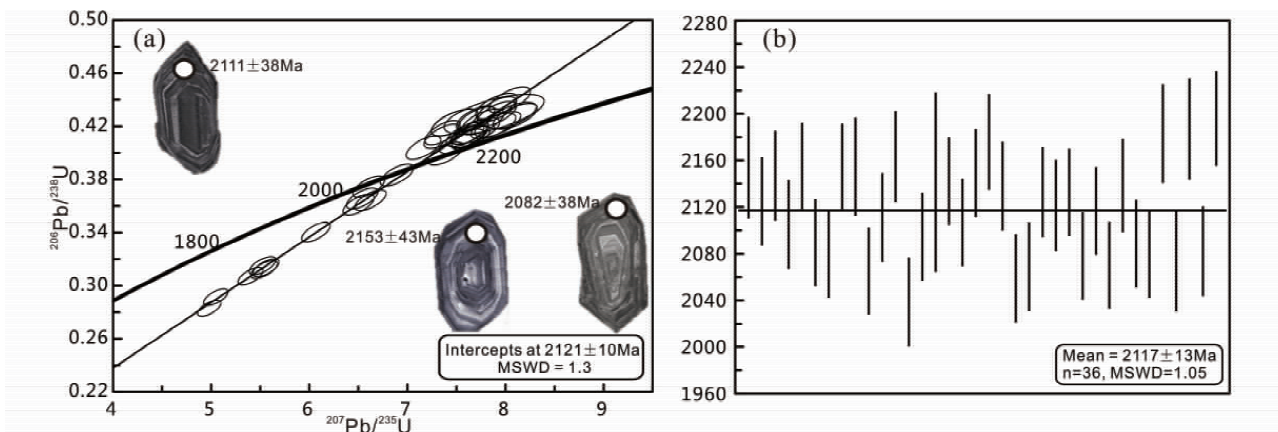


图 3 铜峪变石英二长斑岩的锆石年龄谐和图 (a) 和加权平均图 (b)

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams (a) and weighted average diagrams (b) for the samples of the BF6

表1 铜矿峪变石英二长斑岩(BF6)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results for the Tongkuangyu metamorphic quartz-monzonite porphyry

Spot	Th/U	Th U		Isotope ratios						Age estimates (Ma)				
		($\times 10^{-6}$)		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$
BF6-1	0.48	63	130	7.55463	0.15162	0.40878	0.00619	0.11560	0.00219	2154	43	2180	18	2209
BF6-2	0.33	87	262	7.64653	0.12951	0.41146	0.00588	0.11954	0.00199	2163	39	2190	15	2222
BF6-3	0.45	316	703	4.98212	0.07893	0.28293	0.00395	0.07869	0.00111	2069	38	1816	13	1606
BF6-4	0.46	53	116	7.92206	0.15452	0.42145	0.00634	0.12237	0.00231	2183	42	2222	18	2267
BF6-5	0.38	44	116	8.06554	0.16407	0.42808	0.00655	0.11648	0.00248	2187	43	2238	18	2297
BF6-6	0.35	163	460	6.62489	0.10502	0.36426	0.00512	0.09938	0.00150	2125	38	2063	14	2002
BF6-7	0.29	79	271	7.90994	0.13267	0.42936	0.00617	0.12519	0.00215	2147	39	2221	15	2303
BF6-8	0.54	248	463	6.89311	0.11151	0.38319	0.00544	0.10791	0.00155	2105	38	2098	14	2091
BF6-9	0.37	126	345	7.38981	0.11977	0.39937	0.00568	0.11030	0.00172	2154	38	2160	15	2166
BF6-10	0.40	198	488	6.06838	0.09566	0.34030	0.00479	0.09743	0.00140	2090	38	1986	14	1888
BF6-11	0.40	201	499	5.55831	0.08842	0.31341	0.00442	0.08372	0.00123	2080	38	1910	14	1758
BF6-12	0.31	117	382	7.63467	0.12078	0.41257	0.00584	0.11495	0.00178	2154	37	2189	14	2227
BF6-13	0.66	76	116	7.71300	0.15005	0.41670	0.00632	0.11489	0.00204	2155	42	2198	17	2246
BF6-14	0.45	278	621	5.40191	0.08421	0.30711	0.00432	0.07902	0.00111	2065	37	1885	13	1727
BF6-15	0.28	77	272	7.69373	0.12733	0.42608	0.00612	0.11917	0.00203	2111	38	2196	15	2288
BF6-16	0.37	144	383	6.53980	0.10564	0.36554	0.00522	0.09922	0.00153	2095	38	2051	14	2008
BF6-17	0.53	8	15	7.88523	0.33678	0.42912	0.00993	0.11961	0.00506	2141	77	2218	38	2302
BF6-18	0.34	101	298	7.63508	0.12484	0.41531	0.00597	0.11428	0.00184	2142	38	2189	15	2239
BF6-19	0.57	219	385	6.50277	0.10464	0.36097	0.00516	0.09962	0.00142	2107	37	2046	14	1987
BF6-20	0.35	97	276	7.61710	0.12500	0.41262	0.00595	0.11451	0.00182	2149	38	2187	15	2227
BF6-21	0.62	77	123	7.87676	0.15086	0.42019	0.00639	0.11501	0.00199	2176	41	2217	17	2261
BF6-22	0.25	77	302	7.58888	0.12755	0.41376	0.00602	0.11364	0.00209	2138	38	2184	15	2232
BF6-23	0.77	409	529	5.52454	0.08987	0.31504	0.00452	0.07331	0.00102	2059	38	1904	14	1766
BF6-24	0.25	77	307	8.04376	0.13885	0.43983	0.00648	0.12164	0.00234	2133	39	2236	16	2350
BF6-25	0.28	70	249	7.90742	0.13942	0.43517	0.00645	0.11344	0.00214	2121	39	2221	16	2329
BF6-26	0.46	122	265	7.91409	0.13100	0.43276	0.00630	0.11535	0.00179	2133	38	2221	15	2318
BF6-27	0.27	93	342	7.35881	0.11956	0.41508	0.00600	0.11379	0.00192	2078	37	2156	15	2238
BF6-28	0.24	64	265	7.71056	0.12778	0.42545	0.00620	0.11515	0.00208	2117	38	2198	15	2285
BF6-29	0.32	119	372	6.60770	0.10665	0.37442	0.00540	0.10088	0.00161	2070	37	2060	14	2050
BF6-30	0.42	62	147	7.76860	0.14379	0.42336	0.00640	0.12251	0.00223	2138	40	2205	17	2276
BF6-31	0.28	102	361	7.35526	0.12230	0.41242	0.00602	0.11445	0.00200	2089	38	2156	15	2226
BF6-32	0.38	122	321	7.16502	0.11715	0.40380	0.00586	0.10659	0.00169	2080	37	2132	15	2187
BF6-33	0.71	68	96	7.48106	0.15710	0.42292	0.00668	0.10973	0.00201	2074	44	2171	19	2274
BF6-34	0.52	253	487	5.53920	0.08967	0.31210	0.00439	0.08134	0.00118	2082	38	1907	14	1751
BF6-35	0.36	62	174	8.09932	0.14907	0.42753	0.00632	0.12272	0.00233	2196	41	2242	17	2295
BF6-36	0.52	255	490	5.04725	0.08199	0.29126	0.00414	0.07525	0.00110	2039	38	1827	14	1648

2 分析方法

锆石样品完全由人工挑选,未使用任何化学试剂。首先将岩石破碎至 60 目以下,用常规的人工淘洗和电磁选方法分选出比重较大、无磁性的重砂矿物,再通过双目镜用手工方法逐个精选出锆石颗粒,同时观察并记录锆石颗粒的晶体形态和颜色等。最后将精选出来的锆石颗粒固定在环氧树脂靶上,通过打磨、抛光露出锆石的内部结构,然后在光学显微镜下详细观察锆石的形态内部结构,并拍摄透射光和反射光的显微照片。

锆石的阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究所利用 JXA-8100 电子探针完成。U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和 ComPex 102 ArF 准分子激光器(波长 193nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm ,载气为 He。元素比值以 91500 作为外部标样进行校正,微量元素含量以 NIST610 为外标。元素的比率和元素的含量用 GLITTER 4.0 来处理(Griffin *et al.*, 2008),年龄的计算和谐和图用 ISOPLOT 4.15(Ludwig, 2008)完成。详细实验过程、U-Pb 年龄和元素含量计算可参见文献(Yuan *et al.*, 2004),分析结果见表 1。

表2 铜矿峪变石英二长斑岩(BF6)的LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS Hf composition of zircons from Tongkuangyu metamorphic quartz-monzonite porphyry

测点号	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	Age (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
BF6-1	0.281451	0.000017	0.000890	0.000014	0.024446	0.000257	2154	-46.71	0.78	0.39	0.90	2509	2722
BF6-2	0.281305	0.000030	0.001511	0.000035	0.039791	0.000721	2163	-51.88	1.17	-7.79	1.29	2752	3091
BF6-3	0.281410	0.000016	0.001539	0.000036	0.044238	0.000960	2069	-48.15	0.75	-1.58	0.90	2608	2918
BF6-4	0.281395	0.000019	0.001095	0.000002	0.030768	0.000149	2183	-48.69	0.85	-1.38	0.95	2599	2845
BF6-5	0.281432	0.000015	0.001352	0.000018	0.037122	0.000335	2187	-47.39	0.73	-1.83	0.86	2566	2786
BF6-6	0.281437	0.000015	0.001789	0.000021	0.052115	0.000516	2125	-47.21	0.74	-1.80	0.87	2589	2850
BF6-7	0.281401	0.000015	0.001448	0.000042	0.039914	0.000978	2147	-48.47	0.75	-3.48	0.90	2615	2885
BF6-8	0.281385	0.000016	0.000908	0.000022	0.027351	0.000848	2105	-49.06	0.76	-2.20	0.89	2601	2898
BF6-9	0.281410	0.000018	0.001226	0.000016	0.034971	0.000621	2154	-48.18	0.82	-3.21	0.94	2588	2843
BF6-10	0.281444	0.000016	0.001409	0.000009	0.040881	0.000410	2090	-46.96	0.75	-2.46	0.87	2553	2821
BF6-11	0.281398	0.000014	0.001194	0.000006	0.034281	0.000250	2080	-48.58	0.72	-2.14	0.84	2601	2908
BF6-12	0.281423	0.000014	0.001232	0.000022	0.035268	0.000846	2154	-47.70	0.71	-1.30	0.84	2570	2814
BF6-13	0.281417	0.000015	0.001117	0.000019	0.033634	0.000429	2155	-47.92	0.74	-3.34	0.87	2571	2817
BF6-14	0.281394	0.000017	0.001139	0.000029	0.032790	0.000590	2065	-48.74	0.78	-3.18	0.92	2604	2922
BF6-15	0.281438	0.000013	0.001165	0.000014	0.031577	0.000368	2111	-47.17	0.69	-3.23	0.81	2545	2800
BF6-16	0.281436	0.000015	0.000625	0.000006	0.017926	0.000159	2039	-47.24	0.74	-1.31	0.86	2512	2802
BF6-17	0.281381	0.000017	0.000701	0.000010	0.023874	0.000519	2095	-49.21	0.79	-2.34	0.91	2592	2895
BF6-18	0.281439	0.000017	0.001243	0.000016	0.034893	0.000300	2141	-47.15	0.79	-1.05	0.91	2550	2788
BF6-19	0.281406	0.000015	0.001093	0.000031	0.031363	0.001036	2142	-48.32	0.75	-2.79	0.88	2585	2846
BF6-20	0.281423	0.000017	0.001216	0.000020	0.034652	0.000367	2107	-48.32	0.75	-2.79	0.88	2585	2841

锆石的原位 Hf 同位素是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。利用 Neptune Plus 多接收质谱与 RESOLUTION M-50 激光器进行联机。激光束斑直径为 45 μm , 剥蚀频率 8Hz, 来自中国科学院地质与地球物理研究所的 Penglai 锆石作为标样 (Li *et al.*, 2010), 具体分析过程可参见 (Wu *et al.*, 2006)。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄采用的参数如下: $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}(0) = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CC}} = 0.015$ (Veevers *et al.*, 2005), $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), 分析结果见表 2。

3 分析结果

CL 图像显示锆石具有清晰的生长环带并含有熔融包裹体 (图 3a), 锆石的 Th 含量从 $24 \times 10^{-6} \sim 409 \times 10^{-6}$, U 含量从 $73 \times 10^{-6} \sim 703 \times 10^{-6}$, Th/U 比值 0.24 ~ 0.77 (表 1), 大部分锆石颗粒的 Th/U 比值接近或者大于 0.4, 说明锆石应该为岩浆成因 (吴元保和郑永飞, 2004)。锆石的稀土配分图解显示锆石具有明显的 Ce 正异常和轻微的 Eu 负异常, 且重稀土明显富集 (图 4), 也显示出典型岩浆锆石的特征。36 个测点结果显示, 铜矿峪矿床中变石英二长斑岩锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 2065Ma 到 2196Ma 之间变化 (表 1), 在谐和图上大部分分析数据靠近或者在一致曲线上, 上交点年龄

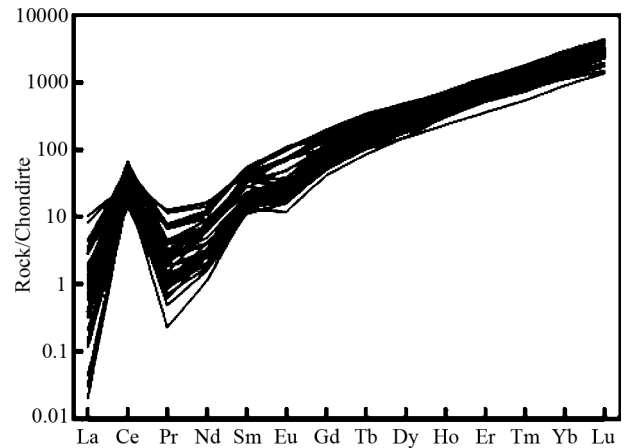


图4 变石英二长斑岩锆石的稀土配分曲线(球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Zircon chondrite-normalized REE diagram (chondritic values are after Sun and McDonough, 1989)

为 $2121 \pm 10\text{Ma}$ (图 3a), 加权平均年龄为 $2117 \pm 13\text{Ma}$ (图 3b), 二者在误差范围内一致。

本文 20 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析, 结果显示其 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.017926 ~ 0.052115 和 0.281305 ~ 0.281451。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002 (表 2) 表明这些锆石在形成以后具有极少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (吴福元等, 2007)。锆石的 Hf 同位素

测试结果见表 2 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-5.71 \sim 0.39$, 平均值为 -2.37 , t_{DM2} 从 $2722 \sim 3091 \text{Ma}$, 平均值为 2855Ma 。

4 讨论

4.1 变石英二长斑岩的形成时代及性质

铜矿峪矿床五号矿体中的变石英二长斑岩的年龄前人进行的讨论较少, 孙海田和葛朝华(1990)利用锆石 U-Pb 稀释法得到的上交点年龄为 $2087 \pm 15 \text{Ma}$, 孙大中和胡维兴(1993)同样利用锆石的 U-Pb 稀释法得到了上交点年龄为 $2195 \pm 64 \text{Ma}$, 但是由于锆石的 U-Pb 稀释法本身的缺陷(在测试过程中会有继承核或者捕虏晶)可能会导致测试的年龄偏大, 而利用 LA-ICPMS 可以有效的避免上述缺陷。孙海田和葛朝华(1990)还报道了变石英二长斑岩和变石英晶屑凝灰岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $1778 \pm 27 \text{Ma}$, Rb-Sr 年龄与锆石 U-Pb 年龄差距如此之大可能是由于后期地质作用(变质或(和)蚀变)使岩石的 Rb-Sr 体系遭到破坏所致。

锆石作为中酸性岩石中常见的副矿物, 具有高达 900°C 的同位素封闭温度(Cherniak and Watson 2001; Lee *et al.*, 1997), 同时锆石富含 U 和 Th, 普通 Pb 含量低而且具有非常高的矿物稳定性, 使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最为常用和最有效的方法之一(吴元保和郑永飞, 2004)。铜矿峪变石英二长斑岩的锆石颗粒显示出的上交点年龄为 $2121 \pm 10 \text{Ma}$ (图 3a), 加权平均年龄为 $2117 \pm 13 \text{Ma}$ (图 3b), 二者在误差范围内一致, 也与陈文明和李树屏(1998)得到的变石英二长斑岩、绢英片岩中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄($2108 \pm 32 \text{Ma}$)基本一致, 暗示了成岩成矿的一致性。

利用 Watson *et al.*(2006)修订的锆石 Ti 温度的计算公式估算出铜矿峪矿床变石英二长斑岩的形成温度介于 $590 \sim 723^\circ\text{C}$ 之间, 平均值为 650°C 。耿元生和周喜文(2011)报道阿拉善地区新元古代早期 A 型花岗岩形成温度为 815°C ; 笔者曾对西天山阿吾拉勒地区 A 型花岗岩锆石的 Ti 饱和温度进行了估算, 其温度均大于 780°C (作者未刊数据), 而且变石英二长斑岩中锆石密集的环带则可能是由于温度较低导致微量元素扩散慢导致的(雷玮琰等, 2013), 这说明铜矿峪变石英二长斑岩不具有 A 型花岗岩的高温特征。

铜矿峪变石英二长斑岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-7.79 \sim 0.39$, 平均值为 -2.44 , 二阶段模式年龄(t_{DM2})从 $2922 \sim 3091 \text{Ma}$, 平均值为 2855Ma 。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) \rightarrow t$ 图解中(图 5)样品落在了 3.0Ga 地壳演化线与 2.5Ga 演化线之间, 而且明显靠近 3.0Ga 线, 说明其具有明显壳源特征, 因此可以推断石英二长斑岩的形成于古老地壳的熔融有关。

4.2 铜矿峪矿床形成的地球动力学背景

华北克拉通在 $2300 \sim 1950 \text{Ma}$ 之间经历了一次基底陆块拉伸-破裂事件(翟明国, 2010; 翟明国和彭澎, 2008), 并导致了 $2200 \sim 2100 \text{Ma}$ 之间华北克拉通在此期间整体上处于一

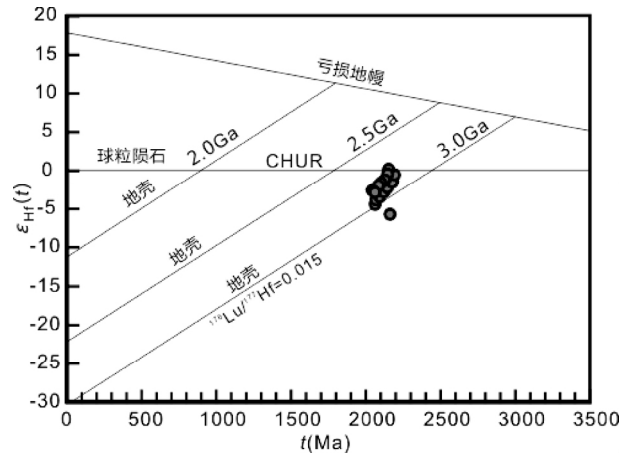


图 5 变石英二长斑岩的锆石 Hf 同位素特征

Fig. 5 Hf isotopic characteristics of the zircons from Tongkuangyu metamorphic quartz-monzonite porphyry

个伸展环境(Du *et al.*, 2012; Zhai and Santosh, 2011; Zhai *et al.*, 2010)。因此在古元古代早期华北克拉通广泛存在着与伸展作用有关的岩浆活动, 在华北地台中部尤为明显。Du *et al.*(2012)在五台地区厘定出了一套年龄为 2137Ma 的 A 型花岗岩, 而且该地区还分布着同时代的镁铁质岩墙(Peng *et al.*, 2005), 说明该地区在 2100Ma 左右经历了一次较强烈的伸展作用; 杜利林等(2009)通过对滹沱群变质玄武岩的地球化学特征研究, 认为该类玄武岩形成于板内裂谷环境, 并且明确指出它的形成与 $2200 \sim 2100 \text{Ma}$ 之间的伸展事件有关(Du *et al.*, 2010); 杜利林等(2012)对吕梁地区吕梁群杜家沟组长石斑岩进行了系统研究, 认为它是造山后伸展环境形成的 A 型花岗岩, 其单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $2186 \sim 2189 \text{Ma}$; 耿元生等(2003)对吕梁山中部的古元古代吕梁群(2300Ma)和野鸡山群(2100Ma)的沉积环境和火山岩的地球化学特征进行了研究, 认为吕梁群和野鸡山群火山岩形成于陆内或大陆边缘裂谷环境; 赵瑞幅等(2011)通过对恒山片麻岩地体中分布的钾质花岗岩侵入岩群的研究, 认为恒山地区在 2100Ma 左右处于伸展环境。

郭红党(2010)将中条裂谷的演化过程分为三个主要期次, 分别为 $2700 \sim 2500 \text{Ma}$ 的扩张期, $2500 \sim 1800 \text{Ma}$ 的沉降期和 1800Ma 之后的封闭期。崔小军等(2007)指出中条山陆缘裂谷的活动时限为 $2500 \sim 1900 \text{Ma}$ 。在中条山地区绛县群上部铜矿峪亚群中分布着一套双峰式火山岩, 其形成时代介于 $2200 \sim 2100 \text{Ma}$ 之间(孙大中等, 1991; 张晗等, 2013), 而双峰式火山岩通常作为指示拉张环境的直接证据(Leat *et al.*, 1986; Li *et al.*, 2002; Suneson and Lucchitta, 1983)。上述已有的研究显示, 包括中条山地区在内, 华北克拉通中部在 2100Ma 左右经历了一次伸展过程, 并发育了较强的岩浆活动。铜矿峪变石英二长斑岩的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 上交点年龄为 $2121 \pm 10 \text{Ma}$, 说明变石英二长斑岩的原岩形成于伸展构造背景, 它更可能是伸展过程地热异常导致地壳部分熔融的

产物。

最早王植和闻广(1957)通过对铜矿峪矿床的围岩蚀变特征、矿石类型以及矿体与斑岩体的关系的研究,认为铜矿峪矿床属于斑岩型铜矿。此后绝大部分研究者均倾向于该矿床为斑岩型铜矿或变斑岩型铜矿(陈文明和李树屏,1998;许庆林,2010;真允庆,1999;Chen *et al.*,1998;胡永胜,2000)。传统观点认为斑岩型矿床与板片俯冲形成的岛弧岩浆岩有密切的成因关系(Mitchell,1973;Sillitoe,1972,2010),但侯增谦等(2007)基于对中国大陆斑岩型铜矿的研究,认为在大陆伸展环境也可以形成斑岩型铜矿。王强等(2004)认为我国著名德兴斑岩型铜矿的形成可能与赣-杭裂谷活动有关,而与成矿有关的斑岩体则是拆沉的下地壳部分熔融的产物(王强等,2004;Wang *et al.*,2006)。鉴于铜矿峪矿床的形成构造环境及形成的时代,作者认为该矿床是一个与古元古代华北克拉通伸展作用有关的斑岩型矿床。

5 结论

(1) 铜矿峪矿床的成矿与成岩时代上具有一致性。变石英二长斑岩较低的形成温度说明其并非A型花岗岩,同时,锆石的Hf同位素特征可以得出变石英二长斑岩的形成与古老地壳的部分熔融有关;

(2) 铜矿峪矿床的形成与华北克拉通的大规模伸展,尤其是中条裂谷的活动导致的地热异常有关,因此铜矿峪斑岩型铜矿属于典型的大陆伸展环境斑岩型矿床。

致谢 野外工作得到了山西省地质调查院李德胜院长,中条山有色金属集团有限公司王智军、赵凤春高级工程师的热心帮助;室内分析工作得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室张红、第五春荣和广州地化所同位素国家重点实验室涂湘林、任钟元等老师的帮助;同时,审稿人张成立教授和祝禧艳博士对稿件修改并提出了宝贵意见,在此一并表示谢忱。

References

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258

Chen WM, Zhang CX and Dang ZF. 1996. Polygenetic mineralization of the Early Proterozoic Tongkuangyu metaporphry copper deposit in the Zhongtiao Mountains, China. In: Ministry of Geology and Mineral Resources (ed.). *Collected Papers of Geological Science*. Beijing: China Economic Publishing House (in Chinese)

Chen WM and Li SP. 1998. Rhenium-osmium isotopic ages of sulfides from the Tongkuangyu porphyry copper deposit in the Zhongtiao Mountain. *Mineral Deposits*, 17(3): 228-238 (in Chinese)

Chen WM, Zhang CX, Lu JR, Deng ZF, Li SP, Cui WB, Ning Y and Cao YJ. 1998. Polygenetic mineralization of the Early Proterozoic Tongkuangyu metaporphry copper deposit in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 72(2): 154-

168

Cherniak DJ and Watson EB. 2001. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172(1-2): 5-24

Cui XJ, Kang FX, Liu JJ and Zhao BS. 2007. Stepwise evolution of Zhongtiao rift and analysis on copper mineralization conditions in Wangwushan region. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 85(1): 24-30 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Ren LD, Wan YS and Wu JS. 2009. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the metabasalts of the Hutuo Group, Wutai Mountains, Shanxi, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 867-876 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Guo JH, Wang W, Ren LD, Wan YS and Geng YS. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. *Chinese Science Bulletin*, 55(17): 1782-1789

Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Wu JS, Zhao L, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2012. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2137Ma Huangjinshan A-type granite porphyry in the Wutai area. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.11.040

Du LL, Yang CH, Ren LD, Song HX, Geng YS and Wan YS. 2012. The 2.2~2.1Ga magmatic event and its tectonic implication in the Lüliang Mountains, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2751-2769 (in Chinese with English abstract)

Emmons WH. 1918. *The Principles of Economic Geology*. New York: McGraw-Hill book Company

Geng YX, Wan YS and Yang CH. 2003. The Palaeoproterozoic rift-type volcanism in Luliangshan Area, Shanxi Province, and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(2): 97-104 (in Chinese with English abstract)

Geng YX and Zhou XW. 2011. Characteristics of geochemistry and zircon Hf isotope of the Early Neoproterozoic granite in Alax area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 897-908 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147

Griffin W, Powell W, Pearson N and O'Reilly S. 2008. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS. In: Sylvester P (ed.). *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 40: 204-207

Guo HD. 2010. Discussion on the relation between evolution and metallogenesis in the Zhongtiao rift. *Mineral Exploration*, 1(5): 441-445 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Pan XF, Yang ZM and Qu XM. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits no related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings. *Geoscience*, 21(2): 332-351 (in Chinese with English abstract)

Hu WX and Sun DZ. 1987. Mineralization and evolution of the Early Proterozoic copper deposits in the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 62(2): 152-164 (in Chinese with English abstract)

Hu YX. 2000. Mineralization and ore prognosis of the Tongkuangyu metaporphry copper deposit. *Mineral Deposits*, 19(1): 46-53 (in Chinese with English abstract)

Leat PT, Jackson SE, Thorpe RS and Stillman CJ. 1986. Geochemistry of bimodal basalt-subalkaline/peralkaline rhyolite provinces within the Southern British Caledonides. *Journal of the Geological Society*, 143(2): 259-273

Lee JKW, Williams IS and Ellis DJ. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390(6656): 159-162

Lei WY, Shi GH and Liu YX. 2013. Research progress on trace element characteristics of zircons different origins. *Earth Science Frontiers*, 20 (in press) (in Chinese with English abstract)

Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y and Kinny PD. 2002. U-Pb zircon

- geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113(1-2): 135-154
- Li XH, Long WG, Li QL, Liu Y, Zheng YF, Yang YH, Chamberlain KR, Wan DF, Guo CH, Wang XC and Tao H. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117-134
- Ludwig K. 2008. Isoplot 3.6: A geochronology toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, 1-77
- Mitchell AHG. 1973. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones. *Nature Physical Science*, 245(143): 49-52
- Peng P, Zhai MG, Zhang HF and Guo JH. 2005. Geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes. *International Geology Review*, 47(5): 492-508
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Sillitoe RH. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184-197
- Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41
- Sun DZ, Li HM, Lin YX, Zhou HF, Zhao FQ and Tang M. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, (3): 216-231 (in Chinese with English abstract)
- Sun DZ and Hu WX. 1993. Precambrian Chronotectonic Framework and Model of Chronocrustal Structure of the Zhongtiao Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Sun HT and Ge CH. 1990. Hydrothermal Exhalative Copper Deposits in Zhongshan District, Shanxi Province. Beijing: Beijing Science and Technology Press (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Suneson NH and Lucchitta I. 1983. Origin of bimodal volcanism, southern Basin and Range Province, west-central Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 94(8): 1005-1019
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA and Griffin WL. 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4): 245-279
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xu JF, Bao ZW and Ma JL. 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315-324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *J. Petrol.*, 47(1): 119-144
- Wang Z and Wen G. 1957. Porphyry copper deposit in Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 37(4): 401-415 (in Chinese with Russian abstract)
- Watson EB, Wark DA and Thomas JB. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151(4): 413-433
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569
- Xu QL. 2010. Study on the geological characteristics and ore genesis of Tongkuangyu copper deposit in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370
- Zhai MG and Peng P. 2008. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665-2682 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24-36 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Li TS, Peng P, Hu B, Liu F and Zhang YB. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton. *Geological Society, London, Special Publications*, 338(1): 235-262
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6-25
- Zhang H, Sun FY and Hu AX. 2013. Geochemistry and geochronology of Shangyupo biotite schist in the Zhongtiao Mountains: Implications for its petrogenesis. *Earth Science*, 38(1): 10-24 (in Chinese with English abstract)
- Zhao RF, Guo JH, Peng P and Liu F. 2011. 2.1Ga crustal remelting event in Hengshan Complex: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf-Nd isotopic study on potassic granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1607-1623 (in Chinese with English abstract)
- Zhen YQ. 1999. Metallogenesis and prospecting of copper ores in the Zhongtiao rift zone. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 19(1): 9-18 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X. 2007. Studies on geological-geochemical characteristics of Tongkuangyu iron oxide-copper-gold deposit in Zhongtiao Mountains, Shanxi Province. Master Degree Thesis. Changsha: Central South University (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈文明, 张承信, 党泽发. 1996. 中国中条山铜矿峪早元古代变斑岩铜矿复合成矿作用. 见: 地矿部科技司编. 地质科学论文集. 北京: 中国经济出版社
- 陈文明, 李树屏. 1998. 中条山铜矿峪斑岩铜矿金属硫化物的铼-钼同位素年龄及地质意义. *矿床地质*, 17(3): 224-228
- 崔小军, 康顺福, 刘家军, 赵百胜. 2007. 中条裂谷的递进演化与王屋山地区铜矿成矿地质条件分析. *地质找矿论丛*, 85(1): 24-30
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 万渝生, 伍家善. 2009. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义. *地质通报*, 28(7): 867-876
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 宋会侠, 耿元生, 万渝生. 2012. 吕梁地区 2.2~2.1Ga 岩浆事件及其构造意义. *岩石学报*, 28(9): 2751-2769
- 耿元生, 万渝生, 杨崇辉. 2003. 吕梁地区古元古代的裂陷型火山作用及其地质意义. *地球学报*, 24(2): 97-104
- 耿元生, 周喜文. 2011. 阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征. *岩石学报*, 27(4): 897-908
- 郭红党. 2010. 中条裂谷演化与成矿作用探讨. *矿产勘查*, 1(5):

441 - 445

- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332 - 351
- 胡维兴, 孙大中. 1987. 中条山早元古代铜矿成矿作用与演化. 地质学报, 62(2): 152 - 164
- 胡永胜. 2000. 铜矿峪变斑岩型含钼铜矿床成矿作用及找矿预测. 矿床地质, 19(1): 46 - 53
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展. 地学前缘 待刊
- 孙大中, 李惠民, 林源贤, 周慧芳, 赵凤清, 唐敏. 1991. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. 地质学报, (3): 216 - 231
- 孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社
- 孙海田, 葛朝华. 1990. 中条山式热液喷气成因铜矿床. 北京: 科学技术出版社
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩石学报, 20(2): 315 - 324
- 王植, 闻广. 1957. 中条山式斑岩铜矿. 地质学报, 37(4): 401 - 415
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 - 220
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589 - 1604
- 许庆林. 2010. 山西中条山铜矿峪铜矿床地质特征及成因研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学
- 翟明国, 彭澎. 2008. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665 - 2682
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 24 - 36
- 张晗, 孙丰月, 胡安新. 2013. 中条山上玉坡地区黑云母片岩成岩时代及成因. 地球科学, 38(1): 10 - 24
- 赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 刘富. 2011. 恒山地区古元古代 2.1Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究. 岩石学报, 27(6): 1607 - 1623
- 真允庆. 1999. 中条裂谷铜矿床的成矿规律及其找矿方向. 桂林工学院学报, 19(1): 9 - 18
- 周雄. 2007. 中条山铜矿峪铁氧化物型矿床地质地球化学特征研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学